

ふじ丸の黒い太陽と赤い水平線

福江 純

〈大阪教育大学 〒582-8582 大阪府柏原市旭ヶ丘 4-698-1〉

e-mail: fukue@cc.osaka-kyoiku.ac.jp



噂に聞く“日食病”などまさかと思っていたが、もの見事に医者でも治せない“日食病”にかかってしまった。最初の、しかし最後ではない、皆既日食観測ツアーを紹介するとともに、皆既日食時に見える赤い水平線のしくみについて少し考えてみたいと思う。

1. 皆既日食×クルーズ＝生きてよかった（笑）

今回参加した『2009年 皆既日食クルーズ』は、豪華客船ふじ丸で、7月20日（月）に姫路港を出港し、22日（水）に皆既日食帯中心線の最大食近傍で皆既日食を観測して、25日（土）に帰港するという、5泊6日のロングクルーズであった。皆既日食はもちろんだが、こんな客船クルーズも初体験だ。

ぼく自身、とくに日食マニアだったわけではなく、2年ほど前に西はりま天文台の黒田武彦さんに誘われたときも、“豪華”客船クルーズに反応したもので、皆既日食は運がよければめっけもんぐらいのつもりだった。

事実、期待以上にふじ丸のクルーズは素晴らしく、予想どおりに“クルーズ病”にはかかってしまった。帰ってからも即座に、ふじ丸のクルーズ予定や、飛鳥IIで世界一周クルーズをしたらどれくらいかかるとかチェック入れたぐらいだ。

一方、クルーズ初日のオリエンテーションで、黒田さんが、“みなさん、きっと日食病にかかりますヨ。これはお医者さんでも治せないの、船の医務室にいても無駄です…”などと、参加者を笑わせていて、ぼくもワハハと笑い流していた。職業柄、太陽の画像なんて飽きるほど見ているし、最近ではひので衛星の詳細なムービーを講義

で見せたりもしていて、“日食病”など、んなアホなと思っていたわけである。

しかし、自分の目で見た“黒い太陽”は、全く違うものだった。もの見事に「日食病」にかかってしまったのである。

ぼくという人間を知っている人なら、「福江さんが、まさか！」と思うだろう。実際、戻って数日後に議論した若手研究者は、「福江さんは、（皆既日食とかはそれほど関心がないという点で）ぼくと同じ人種だと思っていた」と絶句していた。

皆既日食の直前には、ぼくが皆既日食ツアーへ行くことを知った編集の人から『数学セミナー』への紀行文を依頼されていて、それはリアルタイムで報告記事を書き、オフラインだったクルーズ



図1 父島二見港に停泊中の豪華客船ふじ丸。乗客約500人と乗員約130人の合わせて630人ぐらいが乗船していた。一流ホテルが海を泳いでいるようなものである。

から戻った翌日に送稿した（ちなみに、本節のタイトルは、その紀行文のタイトルである）。

しかし、チャンスがあれば、クルーズの、いやいや、皆既日食の素晴らしさをできるだけ多くの人に実体験して欲しいと思い、ほかの雑誌でも報告しようとキーボードを叩くことにした。もっとも全く同じ内容というわけにもいかない。『数学セミナー』では速報的な紀行文を書いたので、『天文月報』誌には観測がらみの事実経過および赤い水平線に関する考察などやや研究よりの話を、そして『天文教育』誌にはクルーズの紹介やピンホール像の実験など読み物的で教育よりの内容を書くことにしたい。詳細で膨大な（笑）報告と精選したデータやアニメーションは、ホームページ (<http://quasar.cc.osaka-kyoiku.ac.jp/~fukue>) を参照していただきたい。

2. 皆既日食観測

ぼくが誘われたのは2年前だが、豪華客船で皆既日食を観測するという計画自体は6年がかりのものらしい。さまざまな案を検討した結果、どうせ行くなら、日本から遠くても（日数が長くなって経費が高くなって）、最大食の起こる小笠原諸島南海の硫黄島近傍まで行こうということになったと聞いている。しかしながら、早くからしっかりした計画が立てられていたので、クルーズだけでも安すぎるくらいの破格の料金だった。

それはともかく、ツアーの最終日にももらった、ふじ丸の航路を図2に示しておく。図2の下部の数値からわかるように、ふじ丸における皆既日食観測は、北緯25度18分、東経142度01分の太平洋上、北硫黄島東方の沖合で実行された。ふじ丸は東南方向に数ノットで微速前進していたはずである。同日、同じ海域には、ふじ丸、ぱしふいっくびいなす、おがさわら丸、世界一周中の飛鳥II、イタリア船のコスタ・クラシカまで計5隻の大型客船が遊弋していたようだ。それぞれ500人ほどの船客を乗せていたので、船の乗組員を除き、

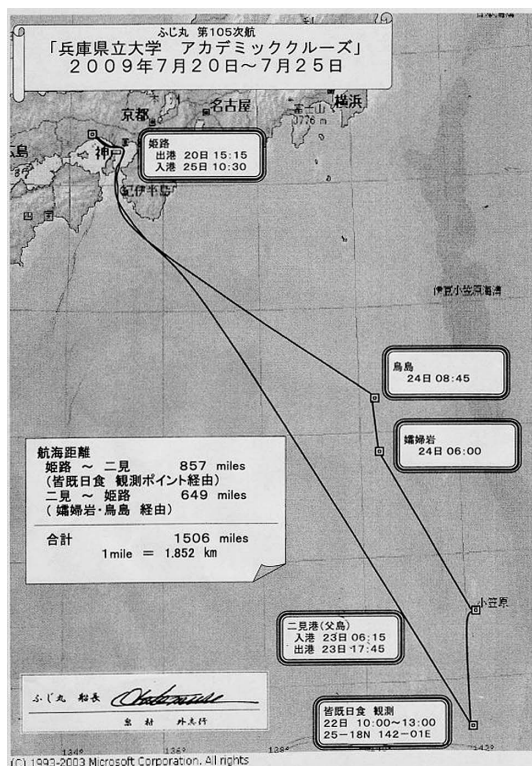


図2 ふじ丸の航路図。出港入港時刻や観測地点の緯度経度が記されている。クルーズ中に操舵室の自由見学ができたが、大机の上で実際に海図も引かれていた。

2,500人ほど（日本人は2,000人程度？）が硫黄島海域にいたことになる。

正確な時刻は記録していないが、記憶やデジカメの時刻などでは、第一接触（部分食の開始）が10:00ごろ、第二接触（皆既食の開始）が11:26ごろ、第三接触（皆既食の終了）が11:33ごろ、第四接触（部分食の終了）が12:55ごろだったと思う。皆既日食の継続時間は6分39秒程度であったようだ。ただし、皆既帯を追いかける方向に航行していたので、0.1秒くらい長くなったという話もある（笑）。

さて、皆既日食の観測中の様子を書こうと思ったが、実はあまりよく思い出せないのだ。写真などの記録はもちろん残っているが、いまでは、黒い太陽と第三接触時のダイヤモンドリングと赤い

水平線しか覚えていないのである。

以下の数パラグラフは、観測の2時間後に書いたもので、ほかの報告と重なるが、この部分はほぼリアルタイムの感想なので、ご寛容願いたい。

・・・

いよいよ、お待ちかねの皆既日食タイム。

金星や水星が見え始めるなか、ついに黒い太陽がその姿を露わにした。何というか、まさに筆舌に尽くしがたいとはこのことだろう。五十余年生きてきて、いろいろな経験をしたが、中でも一、二位を競う素晴らしいセンス・オブ・ワンダー体験だった。

まずは、皆既日食中にだけ肉眼でも見える太陽コロナ。予想外だったのは、太陽を取り巻くコロナが意外に明るいことだった。満月ぐらいとは聞いていたものの、実際にはもっと明るい気がした。

コロナをしっかりと見なければ、直前の10分程度は、アイマスクなどをして暗順応しておいたほうがいと聞いていたが、いろいろ撮影しているうちに皆既になってしまった。しかし十分に最初からコロナは見えるぐらい明るかった。双眼鏡で見たコロナも絶品で、コロナルストリーマーがはっきりとわかった。

また、皆既日食の直前と直後に一瞬だけ現れるダイヤモンドリング。これは予想外の衝撃だった。とくにダイヤモンドリングの出現を動的に肉眼で追いかける感動は、写真からは決してわからなかった(わかっていなかった)。コロナもちろん綺麗だったが、それ以上に、ダイヤモンドリングは超絶的に綺麗だった。

そしてマイ極めつけは全天周ランドスケープ。これも話には聞いていたが、おそらく写真も見たことあるだろうが、頭上に黒い太陽と星空が広がるなか、360度全方位を取り巻く水平線がすべて、まるで夕焼けのように赤くなっているのである。そこには地上(海上)の景色とは思えないような、とても奇妙な風景が広がっている。まるで別の世界に放り込まれたような感じだった。

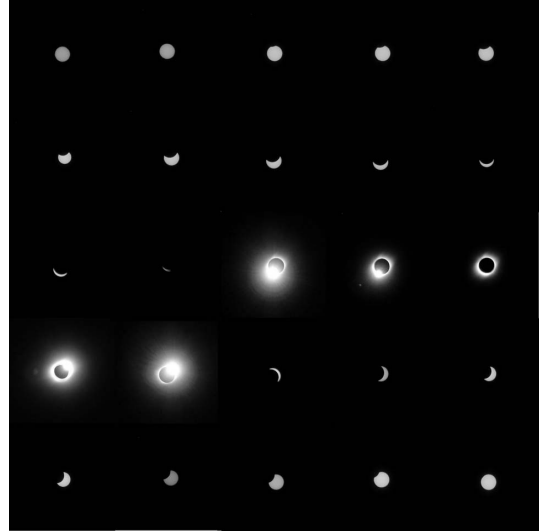


図3 皆既日食の進行。およそ10分おきの画像を並べたもの(皆既の前後は数分おき)。(撮影 福江 慧)

・・・

準備不足や初歩的なミスが重なり、ぼく自身はあまりいい写真が撮れなかったが、同じパーティで撮影した写真を図3(=表紙)に示す。クルーズ中は乗客が退屈しないようにさまざまな企画が組まれていた。その一つに「サイエンストーク」というのがほぼ毎日あって、クルーズ最終日にぼくも「ちょうどよい宇宙」というタイトルで話をした。話本編も聞いてもらえたとは思いますが、皆既日食の翌日に数時間かかって作成し、速報的に見せた図3(をアニメにしたもの)が一番ウケた。美しいショットやビデオとはまた別に、静止画の単純なパラパラマンガもそれなりに印象的だったようだ。

3. 赤い水平線の謎

さて、皆既日食中からずっと“研究者魂(笑)”を刺激しているのは、全周360°の赤い水平線である(図4, 図5)。

この何年かは、ガス中の光の伝播(とくに相対論的輻射輸送)の問題を考えているので、以前から関心のあった虹や青空など大気中の光学現象についても調べている。虹や青空のしくみはよくわかって



図4 赤い水平線。もとのカラー写真は、青黒い上空からしだいに青くなり、いったんは白っぽくなって、水平線の直上は茜色に染まっている。

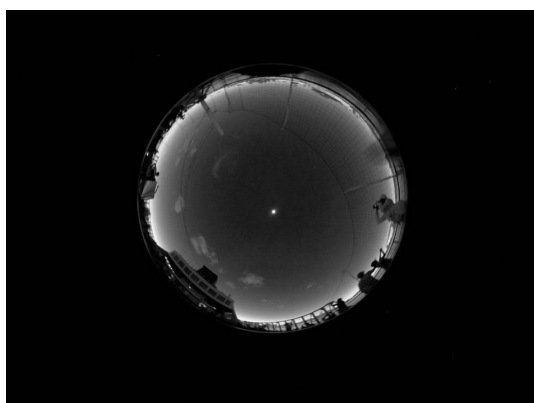


図5 魚眼レンズで撮影した皆既日食時の全天。中央が太陽で周辺が水平線。日食当日に、露出の異なる数枚の中から、もっとも実際の感じに近かったものを選んだ。(撮影 福江 慧)

いてテキスト¹⁾⁵⁾や論文などもあるのだが、夕焼け時の綺麗なグラデーションの再現がうまくいかず、ちゃんとした説明もあまり見つからない。最近では基本から勉強しようかと、Sobolevの古典など数冊のテキスト^{6)~10)}も入手し始めていたところで、この赤い水平線は当然に気になったわけだ。

皆既日食時に赤い水平線が現れる理由は、しばしば夕焼けと同じようなものだと言われるし、後日ネットで見た今回の皆既日食の実況中継などでも、“夕焼けと同じ理由ですね、云々”と説明されていた。しかし、どうにもしっくりしない。な

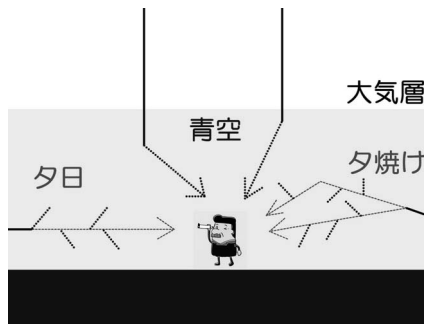


図6 青空と夕日と夕焼けの散乱光。太い実線は白色光，太い点線は青色光，細い破線は赤色光を示す。

にしる、太陽は真上にあるし、太陽と同じ方向ではなく90°離れた方向が一周ぐるりと赤いのである、それほど単純ではない気がするのだ。

3.1 青空と夕焼けのしくみ

まず、青空と夕焼けのしくみから復習してみよう。大気中に入射してきた太陽光線は、大気中のさまざまな微粒子によって「散乱」される。

水滴やエアロゾルによる散乱では、可視光線の波長よりも微粒子のサイズが十分に大きいので、どの波長の光も同じように散乱されて、散乱光は色づかない。だから、雲はたいていは白とか灰色をしている(彩雲のように、回折などのために色がつく場合もあるが)。

一方、空気分子による散乱では、微粒子のサイズが非常に小さいために、散乱の度合いが光の波長(色)によって変わってくることになる。これは「レイリー散乱(Rayleigh scattering)」と呼ばれて、1871年にレイリー卿が導出した昔から知られている問題だ。

具体的には、レイリー散乱の度合いは、光の波長の4乗に逆比例する。青色光の波長は赤色光の波長の1/2ぐらいしかないから、その4乗の逆数で、青色光は赤色光より16倍くらい強く散乱されることになる。その結果、散乱光によって空の色は青くなる(図6)。

では、夕日や夕焼けが赤いのはなぜだろう。

まず、夕日は太陽から直接飛来する光を見てい

る。太陽から直接飛来する光は、レイリー散乱によって青色光がよけいに散乱されているので、日中の太陽も原理的には青色光が減っているはずだ。しかし、日中は、太陽と観測者を結ぶ線上の大気量は少ないので、減光量は小さく気づかない程度なのだろう。専門的には「光学的厚み (optical depth)」が非常に小さいということになる。

しかし、日の出や日没時には、太陽と観測者の間の大気量は多くなり、レイリー散乱の影響が強く現れて青色光が大きく減少し赤色光が残って、夕日は赤くなる (図6)。ただし、それでも太陽は見えるのだから、光学的厚みは1よりも小さい。

夕日と異なり、夕焼けの場合は、太陽からの直接光を見ているわけではない。しかし、夕焼けの光は、夕日の光のようにやはり大気中を長く通過してきて青色光が散らされ赤色光が残った太陽光が、最後になって“一度だけ”散乱されて観測者に届いたもの、だと考えていいだろう (早めに散乱された赤色光も含まれているはずだが)。だから夕焼けも赤くなる (図6)。なお、夕焼け時にも夕日から離れた空がまだ青いのは、大気中をあまり通らずに大気上層に入射した太陽光がレイリー散乱されたためである。

ここで、“一度だけ”という点は、重要である。雲や塵のない澄んだ大気は可視光に対しては非常に透明で、大気的光学的厚みは1より十分に小さい。したがって、目に入る光は、空気中の微粒子によって、せいぜい“一度だけ”散乱された光になると考えていい。これは「1回散乱 (single scattering)」と呼ばれている。

3.2 水平線はどうして赤くなる

次に、皆既日食時の赤い水平線の検討に移りたい。

夕焼けのしくみを念頭において、ごく単純に考えれば、頭上の黒い太陽から入射した光が、水平線のはるか向こうの空で1回散乱され、その後、大気中を長く通過してきて青色光がレイリー散乱で減少した結果、赤色光が残ったためだと説明で

きるだろう。大筋で間違いはないだろうし、その点では、夕焼けと基本的には同じと言ってもいいと思う。

でも、ならば、なぜ、明るい太陽が頭上にある昼間の地平線は赤くないのだろうか。地平線方向から到来する1回散乱光は、レイリー散乱によって赤みを帯びるなら、皆既日食以外のときでも、少しぐらい赤くなってもいいじゃないか。ここが、それほど単純ではないと思う点の一つである。

このことには皆既日食の起こっている皆既帯が関係していると思われる。今回の皆既日食では、皆既帯の幅は255 km程度あり、皆既領域の半径は130 kmぐらいもあった。ちなみに、水平線までの距離は、人の身長で5 km程度、ふじ丸6階のスポーツデッキからだと50 kmほどだったろう。

皆既日食以外のときには、この皆既領域内からも散乱光が到来する。そして近傍からの散乱光はその後赤みを帯びる割合は小さいため、通常ので地平線が赤くなることはないと考えられる。しかし、皆既日食のときには、皆既領域内の散乱光がそっくり抜けるため、水平線方向からやってくる光は、最低でも100 km以上もの大気を通過してくることになる (図7)。大気の厚さが10 km程度であることを考えると、これは十分に長い距離だ。その結果、レイリー散乱で青色光が散らされて、残った赤色光が届くことになるわけだ。実際、ふつうの日中の空でも、地平線方向はよく見ると

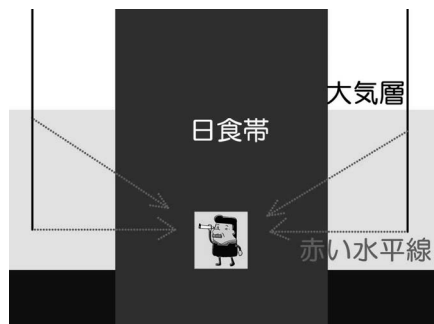


図7 水平線からの散乱光。太い実線は白色光、点線は赤色光を示す。

白っぽい青に見える。つまり近傍のレイリー散乱による青空が遠方から届いた赤い光によって薄められたと考えればいだろう。

もう一つ、夕焼けと違うのは、色合いの変化である。図4はカラーで見ると、水平線が赤く染まっているが、その上は白色をしていて、さらに上空にいくに従い、青から青黒く変化している。これは夕焼けのグラデーションとは違う。

ぼくはしばしば、山の上の大学から降りる道すがら、美しい夕焼けにみとれることがあるが、知ってのとおり、夕焼けの場合は、太陽の周りが赤く、その外側は赤っぽい白から白っぽい青で、太陽から離れるにつれ、青の深みが増すような空の色変化になっている。すなわち、夕焼けと赤い水平線とは色の並びが逆である。

以上のようなことは、おそらくどこかでだれかがすでに考え、あるいはモデル化し、さらに論文などにしていてもおかしくない話だと思う。ただ、手元の大気光学関係のテキストには見当たらず、ネットで少し検索してみても、すぐには見つからなかったのので、簡単な考察にまとめてみた。もし何かご存じの方があれば、ご教示願いたい。

なお、赤い水平線の上空は白から青に変わるので、皆既帯だけが重要なのではないだろう。皆既領域の広さと水平線の色の関連を調べるためには、皆既帯中心線から距離の異なる地点で同時に水平線の観測をしたり、同一地点で皆既領域の通過に伴って水平線の色の変化を観測するなど、より定量的なデータが欲しいところである。すでにそのような観測データの観測データもあるかもしれない。こちらもご教示願えれば幸いである。

冒頭にも書いたように、皆既日食だけは、実際に体験しないと、どういう意味があるのかわからないと思う。ぼく自身わかっていなかった。チャンスがあれば、ぜひ見に行くことを強く勧めたい。本当に人生観が変わること間違いない(笑)。自分自身すでに現実世界に戻って雑用書類の山に埋もれているけど、以前とは世界の見方が変わっ

てしまっていることもわかる。一度は見ておきたい南天の星空と併せて、2012年11月13日のオーストラリアをいまは本気で考えている。

謝 辞

「黒田丸」ツアーを企画した黒田武彦さんと多くのボランティアスタッフの方々には、素晴らしい企画を実行してもらったことについて、この場を借りて深く感謝したい。ふじ丸スタッフのみなさんには、超美味しい料理と手厚いおもてなしについて、厚く御礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) Boyer C. B., 1987, *The Rainbow* (Princeton University Press)
- 2) Greenler R., 1992, 太陽からの贈り物 (丸善)
- 3) 斉藤文一, 武田康男, 1995, 空の色と光の図鑑 (草思社)
- 4) 西條敏美, 1999, 虹 その文化と科学 (恒星社厚生閣)
- 5) 柴田清孝, 1999, 光の気象学 (朝倉書店)
- 6) van de Hulst H C., 1957, 1981, *Light Scattering by Small Particles* (Dover)
- 7) Sobolev V. V., 1975, *Light Scattering in Planetary Atmospheres* (Pergamon Press, Oxford)
- 8) Yanovitskij E. G., 1997, *Light Scattering in Inhomogeneous Atmosphere* (Springer, Berlin)
- 9) Thomas G. E., Stamnes K., 1999, *Radiative Transfer in the Atmosphere and Ocean* (Cambridge University Press, Cambridge)
- 10) Kokhanovsky A. A., 2001, *Optics of Light Scattering Media: Second Edition* (Springer, London)

The Black Sun and Red Horizon Observed from Fuji-maru

Jun FUKUE

Astronomical Institute, Osaka Kyoiku University, Asahigaoka 4-698-1, Kashiwara, Osaka 582-8582, Japan

Abstract: I have observed the total solar eclipse on July 22 in 2009 from Fuji-maru on the sea. It is just a sense of wonder in our beautiful world. I briefly report the observational results and discuss the reason why the horizon becomes reddish during the total eclipse.